

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-14

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

A EXPERIENCIA DA CHESF NA REPOTENCIAÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS DA HIDRELÉTRICA PAULO AFONSO II

E.M. REIS*
CHESF/UFCG
BRASIL

E.G. COSTA
UFCG
BRASIL

L.A. MAGNATA
UFPE
BRASIL

Resumo - *A repotenciação é uma prática que visa estender a vida útil de hidrogeradores, ao mesmo tempo, que procura resgatar a confiabilidade da usina, com maior potência. O presente trabalho foi desenvolvido a partir do estudo de caso, na qual será apresentada a metodologia aplicada na repotenciação das unidades geradoras 01 e 02 da Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso II, onde componentes como: bobinas polares, núcleo do estator e enrolamento estatórico, que possuíam isolamento à base de resina asfáltica, de classe B e com vida útil superada, foram substituídos por materiais com nova tecnologia, possibilitando condições mais severas de operação, aumentando a confiabilidade e elevando a sua capacidade de geração. Foi realizado um estudo dos processos que o fabricante realizou em fabrica e na montagem dos hidrogeradores, abordando as melhorias do novo projeto e relatando os benefícios de cada processo.*
A repotenciação foi a solução ideal, pois proporcionou maior confiabilidade, aumento da disponibilidade das unidades geradoras e o aumento da produção de energia elétrica com melhor eficiência.

Palavras-Chave : Repotenciação, Hidrelétrica Paulo Afonso II, Gerador.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em relação a geração de energia elétrica no Brasil, todos os cáculos apontam para a necessidade de investimentos vultosos dirigidos ao atendimento do crescimento da demanda no país. A CHESF, por necessidade imperiosa devido as várias ocorrências e objetivando manter a disponibilidade que sistema elétrico requer, decidiu repotenciar as unidades geradoras de PAII, mudando a classe de isolamento B para a classe F de acordo com o estado atual da arte. O incremento de potência para cada gerador foi de 13,5 MVA.

2. MOTIVAÇÃO

As freqüentes ocorrências, o fim do sobressalente de barras estatóricas aliado com o tempo de operação das unidades geradoras Usina Hidréletrica de Paulo Afonso II (início de operação 1961) foram os principais pontos que levaram a CHESF a modernizar tais unidades.

3. REPOTENCIAÇÃO

3.1. Gerador

Rua Delmiro Gouveia, 333 – Bongi - CEP 50761-901 - Recife – PE – BRASIL
Tel.: (081) 3229-2184 Fax: (081) 3229-2016 E-mail: emreis@chesf.gov.br

As unidades 01 e 02 da Usina Hidréletrica de Paulo Afonso II apresentavam as seguintes carcteristicas técnicas :

✓ Fabricante :	HITACHI	ALSTOM
✓ Potencia Nominal continua :	69,52 MVA	83 MVA
✓ Fator de Potência Nominal	0,95	0,95
✓ Tensão Nominal :	13,8 kV	13,8 kV
✓ Frequência Nominal :	60 Hz	60 Hz
✓ Número de pólos :	36	36
✓ Velocidade de rotação nominal :	200 rpm	200 rpm
✓ Corrente nominal :	2910 A	3473 A
✓ Regime de operação :	Contínuo	Contínuo
✓ Numero de fase :	3	3
✓ Numero de ranhuras :	378	378
✓ Tipo de enrrolamento :	Imbricado	Imbricado
✓ Classe de isolamento do estator:	B	F

3.2. Enrolamento estatórico

Os geradores 01G1 e 01G2 apresentaram um histórico de ocorrências, envolvendo curtos-circuitos fase-terra no enrolamento do estator. No caso do gerador 01G1 foram registradas sete ocorrências entre 11/01/1974 e 15/07/2006, sendo que, nesta última ocorrência, houve curto-circuito fase-terra. No caso do gerador 01G2 registraram-se três curtos-circuitos fase-terra no período entre 29/12/1994 e 15/07/2005. Os resultados das inspeções nesses geradores mostraram que o enrolamento estatórico apresentava elevado nível de descargas parciais, atribuído à ultrapassada tecnologia de fabricação da isolação.

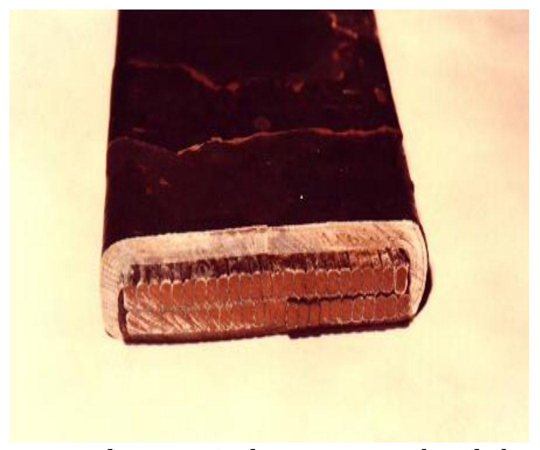


Fig. 1 – Folga entre isolamento e o cobre da barra

A repotenciação do enrolamento estatórico foi determinada pela melhor qualidade da isolação elevando a classe de isolamento térmica de B para F.

A isolação térmica classe F usada nas barras estatórica dos geradores 01 e 02 de Paulo Afonso II é do tipo Micadur. O sistema de isolação Micadur utiliza fitas de tecido de vidro com mica e resina sintética à base de epóxi e poliéster, impregnada a vácuo, a qual apresenta uma rigidez dielétrica de 3 kV/mm, baixas perdas dielétricas e um melhor condutibilidade térmica comparada com isolação térmica classe B.

O enrolamento estatórico é constituído por duas barras, superior e inferior, as quais são formadas por vários condutores, isolados entre si, e transpostos usando tecnologia ROEBEL.

O aumento da potência não deve ser creditado apenas ao emprego de materias tecnologiamente superiores, porque melhorias aplicadas ao sistema de ventilação proporcionaram esse adicional e uma redução da ordem de 19% na secão trasversal das barras do enrolamento do estator.

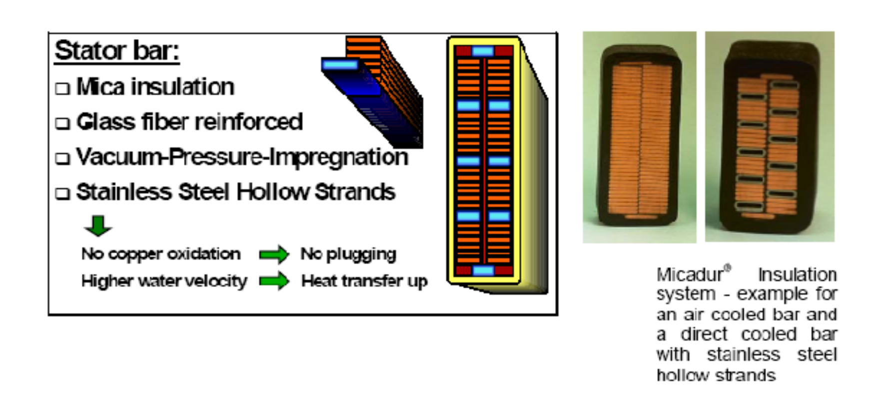


Fig. 2 – Sistema de Isolação Micadur

O projeto de cunhagem das ranhuras do núcleo utilizou cunhas planas, abaixo das quais se encontram calços de enchimento e mola (ripple spring). As barras foram pressionadas evitando movimentos indevidos e o afrouxamento das cunhas, mitigando o risco de ocorrer movimento radial das barras devido as forças de repulsão e atração que ocorrem quando a corrente circula nas barras. Pois quando as barras são de fases diferentes, em alguns ciclos ocorrem que as correntes estão em direção opostas, e se repelem. Em outros, se atraem por estarem na mesma direção.

Estas forças causariam vibrações, e consequentemente, poderiam causar desgaste do sistema de proteção anticorona da barra na região interna à ranhura. Este desgaste pode causar descargas parciais, que prejudica a isolação, reduzindo significativamente a vida remanescente das barras. O sistema de fixação está ilustrado a seguir:

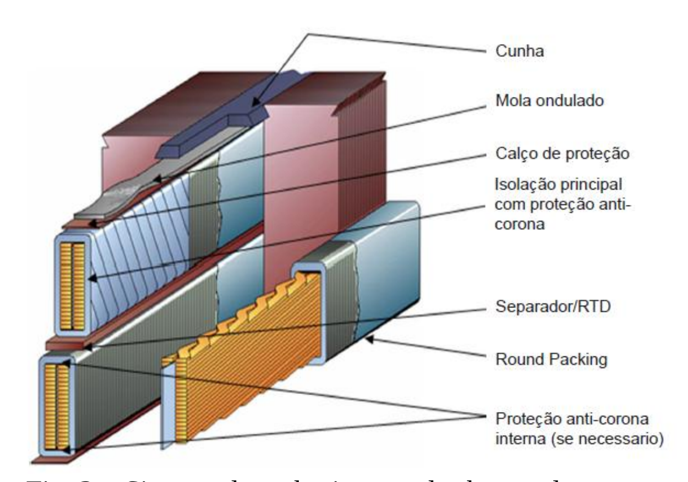
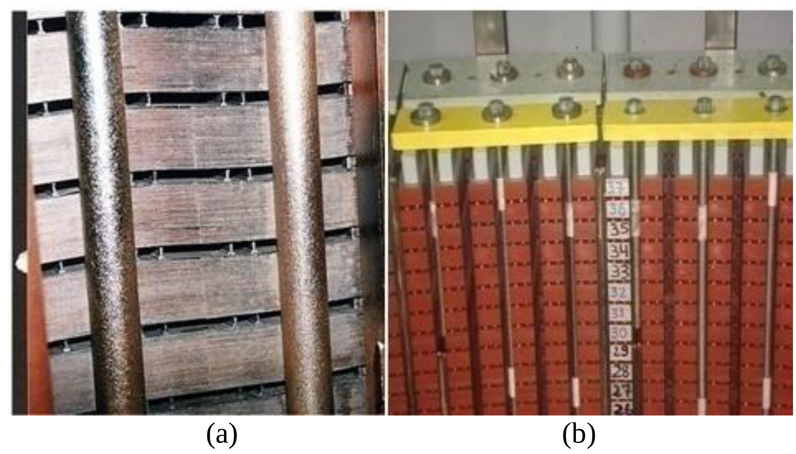


Fig. 3 – Sistema de embutimento das barras do estator

3.3. Núcleo do estator

O antigo núcleo da unidade geradora possuía um sistema de aperto ineficiente. Os tirantes eram soldados às prateleiras da carcaça e não funcionavam no sentido exato da palavra, pois o ideal é que os tirantes não tenham vinculo a carcaça, sofrendo alongamento quando tensionados e funcionando como uma mola para aperto do núcleo. Na concepção anterior, o aperto só era dado pela pressão das placas de aperto, dificultando a compactação das chapas do núcleo. Existiam consideráveis ondulações e folgas nas lâminas do núcleo, como podemos observar na Figura 4. A causa deste fenômeno era a impossibilidade da expansão radial da

carcaça. O aquecimento do núcleo provocava uma dilatação do estator, pois a carcaça não era rígida o suficiente de forma que impedisse esta expansão, o aumento do diâmetro do núcleo provocado pelo aquecimento se transformou em ondulações e folgas.



(a) (b)

Fig. 4 – (a). Núcleo estatórico antigo. Fig. 4 – (b). Núcleo estatórico novo.

O núcleo substituído foi fabricado com chapa de silício, de grão não orientados, laminado a frio, com revestimento em verniz isolado eletricamente em ambos os lados, com perda máxima de 1,35 W/Kg a 1 T, 60Hz. O novo núcleo estatórico considerou os raios externo e interno e dimensões de ranhura para acomodação do novo enrolamento, além de melhorar consideravelmente as condições operacionais do gerador.

Para evitar a flambagem do núcleo foram previstas algumas medidas para prevenir o surgimento deste fenômeno, como a mudança dos dutos de ventilação, melhorando a área de contato entre o ar de refrigeração e o núcleo estatórico, e a otimização do sistema de prensagem das chapas do núcleo.

No processo de montagem do novo núcleo, o empilhamento das chapas foi de forma contínua, garantindo uma maior rigidez e eficácia na montagem do conjunto de chapas, evitando problemas de ondulação. O máximo cuidado foi tomado para prevenir a formação de curtos-circuitos entre lâminas, que poderiam gerar sobreaquecimentos localizados. Durante a montagem na obra, as lâminas foram posicionadas e guiadas pelas cunhas "rabo de andorinha" instalados na carcaça. Estas são previamente posicionadas precisamente sobre o diâmetro interno da carcaça, garantindo a verticalidade do núcleo.

A prensagem do núcleo foi garantida pelo aperto das molas-prato, das placas de prensagem e dos dedos de pressão, através dos tirantes de aperto, que atravessam todo o núcleo e foram projetados de modo a manter o núcleo em estado compacto durante o funcionamento da máquina.

Os dedos de pressão, de material anti-magnético, transferem a pressão de aperto das placas de pressão para os dentes dos pacotes de chapa siliciosa. Assim se assegura que não haja vibrações nos dentes. A Figura 5 apresenta uma ilustração do sistema de prensagem mencionado.

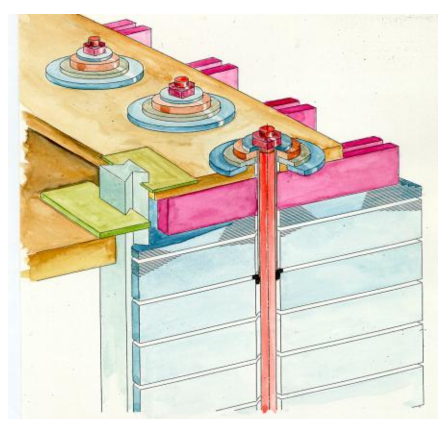


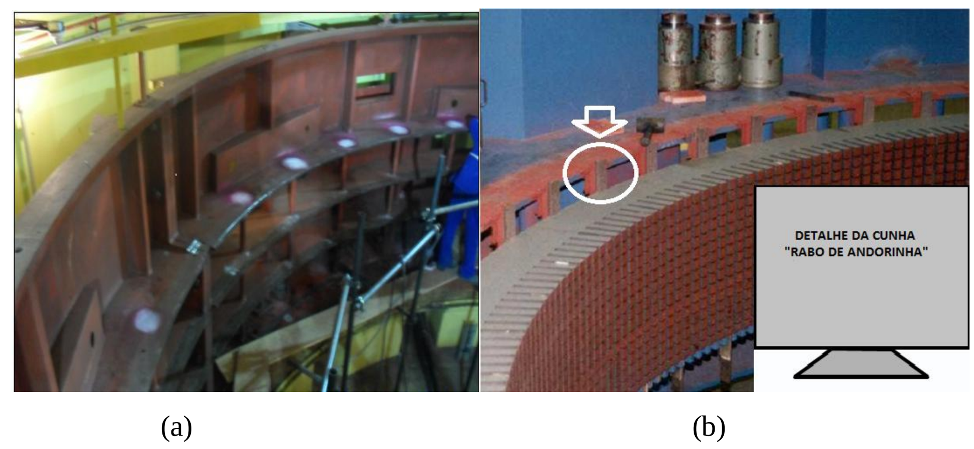
Fig. 5 – Sistema de prensagem do núcleo do estator.

O sistema empregado possibilita independência no sentido axial e, portanto permitirá novos reapertos caso os pacotes de chapas se afrouxem durante a operação da máquina. Este sistema distribui melhor a pressão, resultando um baixo custo de manutenção.

3.4. Carcaça

Na antiga carcaça, os tirantes eram soldados as prateleiras, não funcionando adequadamente. As placas de pressão não conseguiam transmitir a pressão adequada em toda a superfície do núcleo e o reaperto pelo lado inferior do gerador não era possível, pois as porcas eram travadas por meio de soldas nas faces da carcaça. O problema de fixação se agravava com a ventilação ineficiente. O aquecimento do núcleo provocava uma força radial que tendia a expandir, e como o sistema de fixação não funcionava adequadamente e o núcleo estava frouxo, surgiram inevitavelmente ondulações nas lâminas.

A etapa de adequação da carcaça para acoplamento do novo núcleo foi executada com certo nível de dificuldade, principalmente por causa de problemas de nivelamento de alguns itens fabricados diferentemente do projeto original. Esta etapa foi, basicamente, composta da liberação dos pinos de fixação da carcaça com o piso de concreto e seu nivelamento, retirada das chapas de fixação dos tirantes originais para instalação de novos, centragem da carcaça e fixação das novas chapas de suporte das cunhas "rabo de andorinha", para fixação dos pacotes de chapas do novo núcleo. Como pode-se observar na Figura 6.

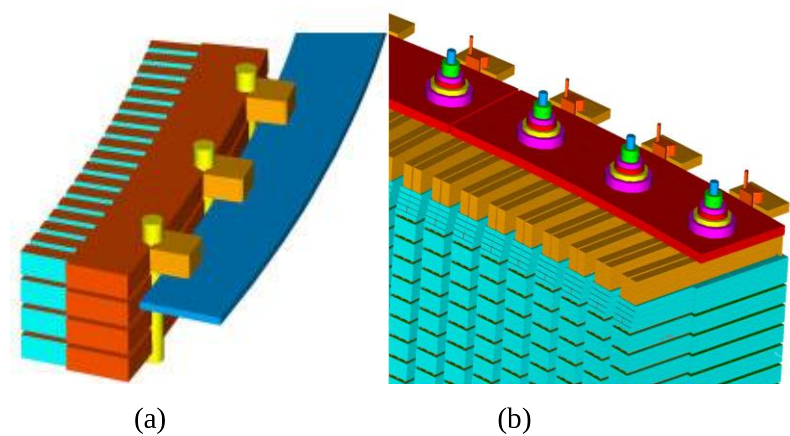


(a) (b)

Fig. 6 – (a). Adequação da carcaça do estator. Fig. 6 – (b). Cunha rabo de andorinha.

Realizada a adequação e nivelamento de novas placas de pressão e seus respectivos dedos de aperto. Foram também efetuadas aberturas de novas janelas (aberturas) de ventilação na carcaça, melhorando o resfriamento do núcleo e das cabeças de bobinas do novo projeto do enrolamento.

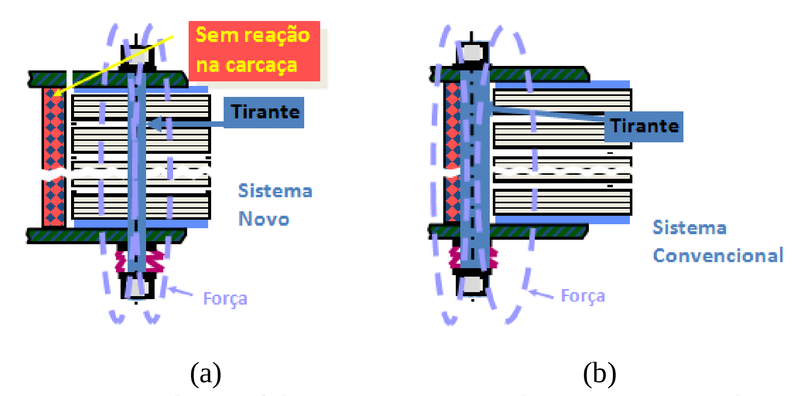
Ao observar a Figura 7, é possível verificar as diferenças entre os sistemas de prensagem e o acoplamento à carcaça.



(a) (b)

Fig. 7 – (a). Sistema de prensagem do núcleo antigo. Fig. 7 – (b). Sistema de prensagem do núcleo novo.

Antes do empilhamento das novas chapas, foram executadas medições visando à centralização da carcaça e a verificação da posição correta das barras “rabo de andorinha” de apoio do núcleo, isto é, a verificação de espaçamento nos sentidos radial, circunferencial e vertical. Onde foram verificados a centralização e nivelamento dos eixos da turbina e corrigidos. No novo sistema de prensagem com tirantes pré-tensionados passantes pelo núcleo, a pressão é exercida apenas no núcleo, e assim, sem reação sobre a carcaça. Como pode-se observar na Figura 8.



(a) (b)

Fig. 8 – (a). Pressão exercida no núcleo antigo. Fig. 8 – (b). Pressão exercida no núcleo novo.

3.5. Pólos do rotor

O antigo núcleo estatórico da unidade geradora 01G1 era fortemente agredido nas suas extremidades pelo fluxo de borda (fluxo na direção axial), em função do comprimento dos pólos do rotor possuir uma dimensão vertical maior do que a altura do núcleo do estator em 110 mm.

Nestas circunstancias, um valor elevado de perdas elétricas era gerado nos pacotes de chapas extremos do núcleo, as quais elevavam demasiadamente a temperatura de trabalho dos mesmos.

Além da elevação da temperatura de trabalho, que atingia mais de 121 °C de acordo com as medições efetuadas, o fluxo axial também propiciava o aparecimento de elevadas forças entre as lâminas componentes destes pacotes, as quais variavam ciclicamente, gerando fortes vibrações.

Estes valores de temperatura, associados à elevada vibração, provocaram um desgaste prematuro das lâminas, deteriorando-as, causando sérios riscos das mesmas fragmentarem e atingirem as barras estatóricas.
Considerando as recomendações da Proposta de Normatização IEEE Std. 1147-1991, foi feito o diagnostico das bobinas polares que possui isolação entre espira classe B.

Quando da especificação dos serviços de repotencição, muito se discutiu à respeito da necessidade ou não, de se alterar a classe de isolamento do rotor dos dois geradores de B para F. Após ensaios de aquecimento e estudo sobre o incremento da temperatura do rotor, conclui-se pela manutenção da classe de isolamento existente. No ensaio de comissionamento final pode-se constatar efetivamente que a classe B atendia, com folga, as elevações de temperatura do novo regime de operação da máquina.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Com o passar dos anos, a confiabilidade e disponibilidade das unidades geradoras da Usina de Paulo Afonso II estava diminuindo, devido ao envelhecimento do isolamento das bobinas estatóricas e das bobinas polares, e a deformação e afrouxamento do núcleo do estator. Aumentando os custos de manutenção e os índices de falhas graves com possibilidade de perda do equipamento.

Foi necessário realizar uma repotenciação nas unidades geradoras, onde os enrolamentos estatóricos antigos à base de mica asfáltica, com classe de isolação B, foram substituídos por fitas de mica reforçadas com fibra de vidro e aglutinadas com resina sintética à base de epóxi e poliéster, de classe F. O sistema de isolação, assim constituído, apresenta rigidez dielétrica de 3 kV/mm, baixas perdas dielétricas e o dobro do coeficiente de condutibilidade térmica em relação aos antigos materiais asfálticos que eram utilizados. E com uma camada de espessura de isolamento mais fina que a anterior, possibilitando aumentar a seção de cobre do enrolamento, consequentemente a densidade de corrente. Com isso, a capacidade de circulação de corrente foi aumentada, permitindo o aumento da capacidade de transferência de potência, sem exceder os limites térmicos do enrolamento. Esse foi o ponto mais significativo para o aumento de potência de máquinas.
Com a substituição do material da isolação, a elevação máxima de temperatura do enrolamento estatórico, acima da temperatura máxima de 40°C do ar de resfriamento na saída dos radiadores, passou para 90 °C, para toda faixa operativa do gerador.

O sistema empregado para inserção das barras nas ranhuras do núcleo do estator assegurou um embutimento perfeito com folga tendendo a zero, mesmo considerando-se variações dimensionais da barra ou da ranhura. Aumentando o coeficiente de transmissão de calor, minimizando a possibilidade de criação de descargas parciais entre o núcleo do estator e as barras e eliminando a possibilidade de calços saindo da ranhura mesmo após anos de operação.

Porém outros fatores ajudaram na repotenciação, como os processos desenvolvidos no núcleo e nos pólos do rotor.

O novo núcleo estatórico considerou os raios externo e interno e dimensões de ranhura para acomodação do novo enrolamento, além de melhorar consideravelmente as condições operacionais do gerador.
Com o propósito de transmitir os esforços radiais e tangenciais provenientes da dilatação térmica, o núcleo e as placas de pressão foram ligados por meio de tirantes verticais. Este novo sistema de prensagem mantém o estator dentro de suas condições concêntricas e cilíndricas e, ao mesmo tempo, permite resistir ao torque nominal e a esforços provenientes de falhas elétricas. O núcleo do estator foi fixado à carcaça por meio de cunhas tipo rabo de andorinha e guias da cunha, os quais transmitem os esforços tangenciais e radiais do núcleo à carcaça do estator. O sistema empregado possibilita independência no sentido axial e, portanto, permitirá novos reapertos caso os pacotes de chapas se afrouxem durante a operação da máquina.

As novas bobinas polares receberam novos isolamentos de resina entre si, classe F, substituindo a isolação antiga de classe B. E as bordas externas das espiras tiveram os perfis estreitados, formando assim uma espécie de aleta de resfriamento, melhorando a dissipação do calor. Com a substituição do material da isolação, a elevação máxima de temperatura do enrolamento do rotor, acima da temperatura máxima de 40°C do ar de resfriamento na saída dos radiadores, passou para 95 °C.

Após a repotenciação tornou o gerador preparado para potência nominal de 83 MVA (uma repotenciação de 19% em relação à potência original de 69,52 MVA), com classe de isolação F e elevou seus limites operacionais.

5. CONCLUSÃO

Foram apresentadas as definições e as principais diretrizes da repotenciação das unidades geradoras da Usina de Paulo Afonso II, onde se obteve um ganho de 19% de potência sem interferência na parte civil e com um aumento de vida útil estimada em 40 anos. Dentro deste contexto, foi dada ênfase para os principais equipamentos envolvidos na repotenciação: núcleo do estator, enrolamento estatórico e pólos do rotor. Com a troca de componentes, foi possível introduzir novas técnicas de engenharia no reprojeto do gerador, com a garantia de se obter a mesma disponibilidade, aumento de sua expectativa de vida e redução dos custos de manutenção. Trazendo-os para uma situação compatível com o atual estado da arte da tecnologia de geração de energia hidrelétrica.

A utilização de isolamentos mais eficientes e das ligas mais leves, dos aços siliciosos de baixas perdas, tornaram proveitosa as substituições das partes vulneráveis do equipamento por componentes portadores de uma suportabilidade e de uma perspectiva de vida bem superiores. Benefícios de segurança e confiabilidade do abastecimento de energia elétrica foram conseguidos através desta repotenciação. Com a vantagem de não oferecer impactos ecológicos e com um tempo de implantação muito inferior ao da construção de uma nova UHE, além das vantagens econômicas.

Assim, pode-se afirmar que a repotenciação de usinas hidrelétricas surge como uma importante alternativa para se obter ganhos de potência, tornando o empreendimento mais atrativo aos investidores e à sociedade.

BIBLIOGRAFIA

[1] W. Morgante, T. Kunz, M. Uemori, “Repotenciação da Usina de Elevação de Racoon Mountain (USA)”, XVIII SNPTEE-2005.

[2] F. Sá, “Repotenciação de Hidrogeradores: Uma proposta de metodologia de análise e implantação” , ABB Power Generator.

[3] T. Kunz, “Technical Training on Hydro Generators – Hydro Generator Technology Center”, HGT, Birr, 2001.

[4] M. Uemori, P. Oda, J. Beffa, F. Sá, “Reabilitação, Modernização e Futura Repotenciação das Máquinas de Ilha Solteira”, XVIII SNPTEE-2005.